



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V
BRATISLAVE

Stavebná fakulta
Katedra vodného hospodárstva krajiny

Ing. Adam Brziak

Autoreferát dizertačnej práce

Frekvenčná analýza prietokov s využitím syntetických klimatických údajov
a zrážkovo odtokového modelovania

na získanie akademického titulu „doktor“ („**philosophiae doctor**“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: 104303 Vodohospodárske inžinierstvo

v študijnom odbore: stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Bratislava 2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre vodného hospodárstva krajiny Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Adam Brziak**
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD.**
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný: 28.5.2025

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa: 28.8.2025

na Katedre vodného hospodárstva krajiny Stavebnej fakulty STU v Bratislave, Radlinského 11

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan fakulty

Obsah

1	Úvod	4
2	Ciele dizeračnej práce.....	4
3	Metodika.....	5
3.1	Záujmová oblasť.....	6
3.2	Vstupné údaje	6
3.3	Popis modelu	8
4	Výsledky	9
4.1	Vyhodnotenie kalibrácie modelu	9
4.2	Hydrologická bilancia vody v povodiach.....	12
4.3	Vyhodnotenie frekvenčnej analýzy prietokov.....	14
5	Závery pre vedu a prax	16

Abstrakt

Dizertačná práca sa zaoberá kvantifikáciou a znížením neistôt pri modelovaní zrážkovo-odtokových procesov, s dôrazom na určenie extrémnych prietokov pomocou frekvenčnej analýzy. V rámci práce bol vytvorený komplexný modelovací rámec, ktorý kombinuje stochastické generovanie meteorologických údajov, distribuovaný zrážkovo-odtokový model a štatistické nástroje frekvenčnej analýzy. Cieľom bolo použiť syntetické dlhodobé rady prietokov, ktoré by umožnili spoľahlivý odhad extrémnych hydrologických udalostí aj v podmienkach obmedzenej dostupnosti pozorovaných dát.

Model bol aplikovaný na niekoľko typovo odlišných povodí, pričom osobitná pozornosť bola venovaná kalibrácii a validácii výstupov. Využitá bola aj metóda BIAS korekcie, ktorá kompenzuje systematické chyby v simuláciách. Výsledky ukázali, že navrhovaný postup umožňuje efektívne odhadovať návrhové prietoky pre rôzne doby opakovania a poskytuje konzistentné výstupy v rôznych geografických a klimatických podmienkach.

Abstract

The thesis deals with quantification and reduction of uncertainties in modelling of rainfall-runoff processes, with emphasis on the determination of extreme flows using frequency analysis. The thesis develops a comprehensive modelling framework that combines stochastic meteorological data generation, a distributed rainfall-runoff model, and statistical tools of frequency analysis. The aim was to use synthetic long-term flow series that would allow reliable estimation of extreme hydrological events even under conditions of limited availability of observed data.

The model was applied to several different catchment types, with particular attention paid to calibration and validation of the outputs. The BIAS correction method was also used to compensate for systematic errors in the simulations. The results showed that the proposed procedure allows efficient estimation of design flows for different return periods and provides consistent outputs under different geographical and climatic conditions.

1 Úvod

Spôľahlivé odhady hydrometeorologických extrémov zohrávajú kľúčovú úlohu pri inžinierskych návrhoch snažiacich sa minimalizovať riziko poškodenia zdravia alebo majetku obyvateľstva. Pri zabezpečovaní protipovodňovej ochrany a návrhu protipovodňových opatrení je jedným z dôležitých aspektov určovanie návrhových maximálnych prietokov, zrážkových úhrnov, ako aj návrhových povodňových vln. Určovanie maximálnych návrhových prietokov je možné realizovať priamo prostredníctvom štatistického spracovania radov pozorovaní alebo pomocou nepriamych metód odhadu. Hlavným problémom pri spoľahlivom odhadovaní extrémnych povodňových prietokov sú najmä krátke historické záznamy o prietokoch. Tieto môžu byť zároveň často nekompletné alebo ovplyvnené napríklad reguláciami vodných tokov, zmenami využitia krajiny atď. V dôsledku toho vznikajú značné neistoty pri klasickej empirickej frekvenčnej analýze. Nesprávne odhadnutie povodňových prietokov môže mať do značnej miery aj ekonomické následky. Vieme že vodné stavby sa svojou robustnosťou a zložitnosťou technologických postupov stávajú veľmi nákladnými, často až strategickými investíciami. Predimenzovanie takýto stavieb môže rapídne navýšiť náklady na výstavbu. Na zreteľ však musí byť braná najmä bezpečnosť týchto stavieb, ktorá je prvoradá. Preto vzniká potreba čo najpresnejšie odhadnúť prietoky s rôznou dobou opakovania, aby bolo možné ich vhodne aplikovať do inžinierskej praxe.

Zvolený prístup kombinuje využitie stochasticky generovaných údajov, zrážkovo-odtokové modelovanie, frekvenčnú analýzu prietokov a korekciu systematických chýb. Aplikácia na rôzne typovo odlišné povodia by nám mala odhaliť slabiny prístupu, poprípade potvrdiť robustnosť a prenositeľnosť na iné regióny. Dizertačná práca sa zameria na detekciu zmien v meraných a odvodených hydrometeorologických radoch v pozorovanom regióne. Pre potreby frekvenčnej analýzy prietokov, nie sú dostupné dostatočne dlhé rady pozorovaných prietokov. Preto budú využité dlhé syntetické rady prietokov, na ktoré bude aplikovaná frekvenčná analýza prietokov. Na analýzy budú použité meteorologické a hydrologické dáta z rôznych databáz. Výsledky výskumu by mali priniesť poznatky týkajúce sa zníženia neistôt pri odhade návrhových hodnôt maximálnych prietokov.

2 Ciele dizeračnej práce

Ciele dizertačnej práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- Analýza súčasných prístupov k zrážkovo-odtokovému modelovaniu, vrátane porovnania stochastických a deterministických metód, s cieľom identifikovať vhodnú kombináciu pre simulácie na rôznych typoch povodí;
- Implementácia a kalibrácia zrážkovo-odtokového modelu, ktorý je schopný pracovať s priestorovo a časovo rozlíšenými vstupnými údajmi;
- Analýza režimu syntetických radov zrážkových úhrnov a teplôt vzduchu a vyhodnotenie ich vhodnosti použitia v zrážkovo-odtokovom modelovaní;
- Využitie modifikácie koncepčného a distribuovaného zrážkovo-odtokového modelu s dôrazom na správnu simuláciu extrémnych prietokov;
- Využitie frekvenčnej analýzy prietokov na odhady vysokých dôb opakovania;
- Vyhodnotenie vplyvu jednotlivých typov neistôt (napr. neistoty v údajoch o snehovej pokrývke a vlhkosti pôdy) na výsledky simulácií prietokov;
- Porovnanie výsledkov pre rôzne povodia s rozdielnymi klimatickými, hydrologickými a morfológickými podmienkami, čo umožňuje overenie robustnosti a prenositeľnosti navrhnutého postupu;
- Zhodnotenie možnosti použitia výsledkov odhadov v inžinierskej praxi.

3 Metodika

Táto kapitola bude venovaná metodickým postupom a využitiu vybraného typu zrážkovo-odtokového modelu, generátora počasia a frekvenčnú analýzu pretokov. Metodika bola súčasne využitá v rámci medzinárodného projektu, na ktorom som ako doktorand spolupracoval v rámci stáže na TU Viedeň. Pre potreby projektu bol vytvorený zrážkovo-odtokový model určený na simuláciu prietokov v riekach, s využitím syntetických meteorologických vstupov, generovaných stochastickým generátorom počasia. Hlavným cieľom bolo navrhnúť a implementovať postup, ktorý umožní sledovať neistoty v procese zrážkovo-odtokového modelovania na povodí s veľkou rozlohou. Následne tieto neistoty kvantifikovať a v čo najväčšej miere odstrániť. Pre lepšie znázornenie boli do výsledkov vybrané rôzne povodia z rôznymi morfológickými, hydrologickými a meteorologickými charakteristikami.

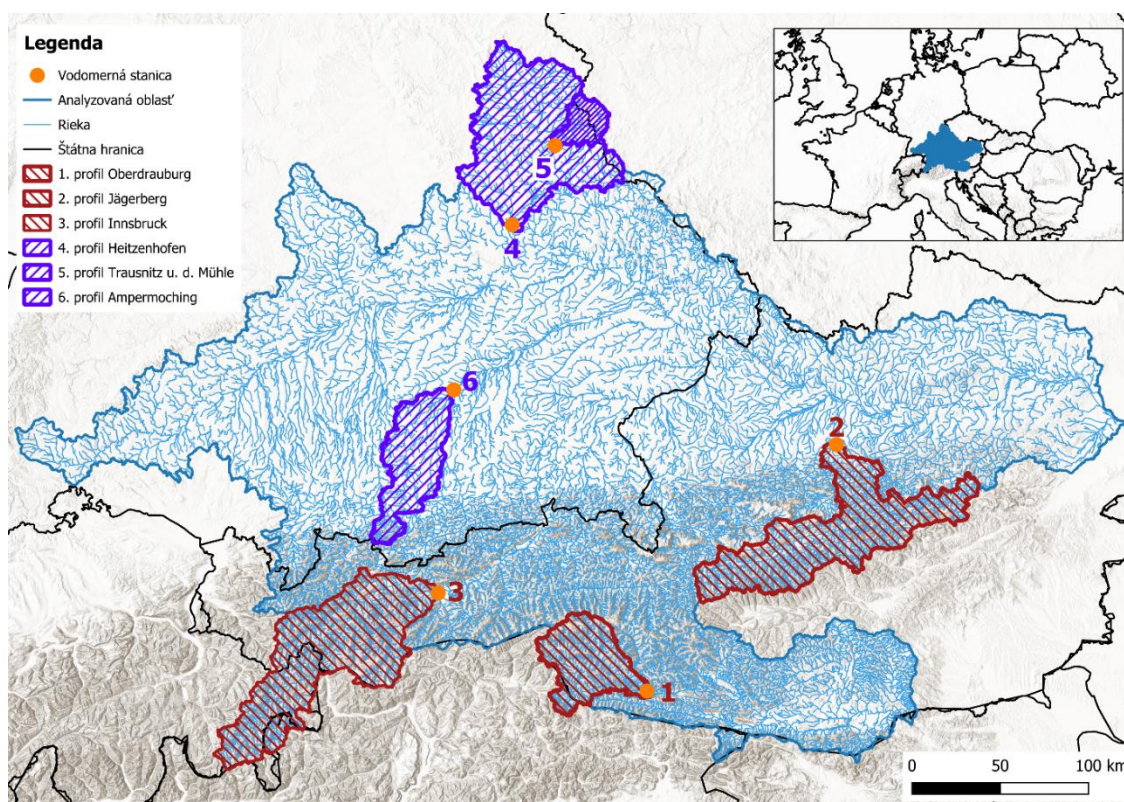
Práca kombinuje deterministické a stochastické prístupy pri tvorbe syntetických údajov a ich použití pri modelovaní odtoku. V simuláciách bolo spracované množstvo údajov a pri úprave vstupných dát musela byť braná do úvahy aj výpočtová náročnosť modelu a nároky na hardvér. Ďalšou významnou súčasťou metodického postupu je použitie údajov z diaľkového prieskumu Zeme a spracovanie veľkého množstva meteorologických a hydrologických dát.

Hlavným cieľom zrážkovo-odtokových modelov je simulovať transformáciu zrážkových vstupov na odtok v konkrétnom území. Cieľom je predikovať množstvo a časový priebeh odtoku ako odozvu na zrážky. Tieto modely umožňujú identifikovať významné mechanizmy odtoku a poskytujú základ pre rozhodovanie v oblasti plánovania, ochrany pred povodňami, využívania pôdy a vodného hospodárstva (Beven, 2012; Chow et al., 1998). Samotné hydrologické modelovanie bolo realizované pomocou distribuovanej verzie zrážkovo-odtokového modelu HBV, ktorý umožňuje flexibilnú prácu so vstupnými údajmi aj s parametrami modelu (Valent, 2022). Model bol vybraný najmä z dôvodu aplikácie na rozsiahlom území povodia Dunaja, Drávy a rieky Inn. Oblasť výskumu reflektuje diverzitu hydrologických režimov, od poľnohospodárskych oblastí až po Alpské ľadovcové oblasti, preto boli pre lepšie zachytenie variability klimatických podmienok a geografických charakteristík vybrané a porovnané rôznorodé povodia, 3 s alpskou alebo horskou morfológiou, z čoho v jednom z povodí sa nachádza aj ľadovec, a 3 povodia s rovinnejšou morfológiou, s vyšším podielom poľnohospodárstva a urbanizovanej plochy.

Zrážkovo-odtokové modely nachádzajú uplatnenie v širokom spektre vodohospodárskych disciplín, vrátane frekvenčnej analýzy prietokov. V tomto kontexte sa využívajú najmä na kontinuálnu simuláciu odtoku z povodia. Významnou výhodou ich aplikácie pri frekvenčnej analýze je možnosť kombinácie so stochastickým modelovaním zrážok, čo umožňuje generovať syntetické časové rady ľubovoľnej dĺžky. Z takto vytvorených údajov možno následne efektívne odvodiť hydrologické charakteristiky povodní, ako sú kulminálny prietok, objem odtoku alebo trvanie povodňovej udalosti (Valent, 2012). Frekvenčná analýza prietokov predstavuje dôležitý nástroj pre odhad pravdepodobnosti výskytu extrémnych hydrologických udalostí, ktoré zohrávajú kľúčovú úlohu pri návrhu vodohospodárskych stavieb a protipovodňových opatrení. V rámci dizertačnej práce bola táto analýza aplikovaná na súbor simulovaných prietokových radov získaných stochastickým generovaním klimatických údajov a následnou hydrologickou simuláciou pomocou distribuovaného zrážkovo-odtokového modelu. Pozornosť bola venovaná šiestim vybraným povodiam, pre ktoré existovali dostatočne dlhé pozorované rady, ktoré umožnili overenie presnosti a robustnosti simulácií. V prípade že vznikne potreba odhadovať maximálne povodňové prietoky s dobou opakovania väčšou ako 100 rokov, zvyčajne nie sú dostupné dostatočne dlhé údaje o prietokoch. Preto bola na vyhodnotenie maximálnych prietokov využitá kontinuálna simulácia dlhých radov prietokov až 10 000 rokov, spojená so štatistickým vyhodnotením významnosti prietokov.

3.1 Zájmová oblasť

Hydrologický model bol zostavený pre povodie horného Dunaja a rieky Dráva. Oblasť horného Dunaja bola uvažovaná od prameňa po vodomernú stanicu s názvom Fischamend (ID 207 258), ktorá leží približne 20 km po toku Dunaja od Viedne, po prítok rieky Fischa. Rozloha tohto povodia je 103 312 km². Pre povodie rieky Dráva bol vybraný úsek po mesto Lavamünd ktoré leží na pohraničí Rakúska a Slovinska, rozloha tohto povodia je 12 055 km². Pre lepšiu reprezentáciu výsledkov bolo vybraných 6 vzorových povodií ktoré sú znázornené na obrázku č. 1. Červenou farbou sú znázornené horské-alpské povodia (1-3) a fialovou nížinné povodia (4-6). Informácie o povodiach sú z národných databáz: eHYD (Rakúska národná databáza vodných tokov), GRDC (globálna databáza s údajmi o prietokoch), BfG (Nemecký hydrologický servis).

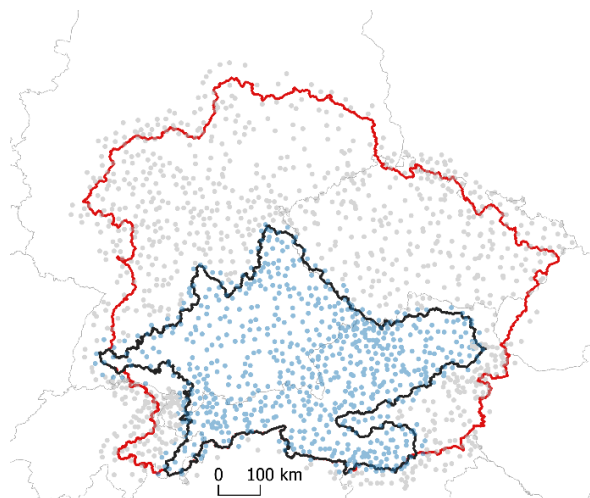


Obr. 1 Vybrané povodia 3 horské (červená), 3 nížinné (fialová) farba

3.2 Vstupné údaje

Pri zrážkovo-odtokovom modelovaní zohrávajú zrážky najdôležitejšiu úlohu pri simulovaní odtoku z povodí, sú základným komponentom hydrologického cyklu a významne ovplyvňujú všetky ekosystémy. Do úvahy musí byť zobrať vysoká priestorová a časová variabilita zrážok ktorá vytvára neistotu pri modelovaní odtoku. Preto je základom čo najhustejšia sieť zrážkomerných staníc, ktorá poskytne vhodné množstvo údajov pre hydrologický zrážkovo-odtokový model. Povodie obsahovalo 1732 zrážkomerných staníc, pre ktoré existujú historické záznamy o denných zrážkových úhrnoch a pre ktoré boli vytvorené syntetické hodinové rady zrážkových úhrnov generované stochastickým generátorom počasia. Keďže hydrologický model povodia horného Dunaja a povodia Drávy, predstavuje len časť študijného územia, na modelovanie odtoku bola využitá iba podmnožina 748 zrážkomerov (obr. č. 2). Táto podskupina obsahuje všetky zrážkomery ktoré sa nachádzajú v povodí horného Dunaja a Drávy, ako aj zrážkomery ktoré sa nachádzajú v blízkosti hranice pozorovaného územia v maximálnej vzdialenosti 25km. Niektoré zrážkomerné stanice boli ručne odstránené zo vstupného datasetu, z dôvodu že napríklad susedili

v bezprostrednej blízkosti. Tento krok bol potrebný hlavne z dôvodu zníženia výpočtových a pamäťových požiadaviek zrážkovo-odtokového modelu.



Obr. 2 Lokalizácia 1732 zrážkomerných staníc s dostupnými údajmi (modrou 748 staníc použitých v práci)

Teplota zohráva kľúčovú úlohu vo viacerých hydrologických javoch a procesoch. Priestorové prerozdelenie teplôt nie je tak variabilné ako je to napríklad u zrážok, z toho dôvodu je dostatočná aj redšia sieť meraní. Teplota má v zrážkovo-odtokovom modeli vplyv najmä na snehový submodel, kde na základe konceptu denného teplotného faktora („degree day factor“) určuje či budú zrážky v tekutom, alebo pevnom skupenstve. Taktiež riadi procesy spojené s topením snehu, vlhkosťou pôdy ale aj s evapotranspiráciou vody z pôdných horizontov. Merané teploty boli dostupné v dennom časovom kroku, ako denné maximá a minimá pre 507 meracích staníc. Pre hodinový časový krok boli v dispozícii dáta z 561 staníc.

Na kalibráciu a validáciu hydrologického modelu povodí horného Dunaja a Drávy sú potrebné merania prietokov zo zvolených vodomerných profiloch za dostatočne dlhé obdobie. Väčšina týchto povodí sa nachádza v Rakúsku a Nemecku a len malá časť vo Švajčiarsku a Taliansku. V Rakúsku poskytuje všetky údaje o prietokoch riek „Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus“, zatiaľ čo v Nemecku prevádzkujú vodomerné stanice a údaje poskytujú jednotlivé spolkové krajiny. Pre túto prácu poskytol údaje o prietokoch nemecký úrad „Landesamt für Umwelt im Bayer und Baden-Württemberg“. Celkovo je hustota vodomerných staníc v Rakúsku a Nemecku veľmi vysoká. Pri kalibrácii modelu často nie je efektívne použiť všetky dostupné vodomerné stanice. Preto sa dôkladne preskúmala existujúca sieť vodomerných staníc a použila sa len potrebná podmnožina 458 staníc. Údaje o prietokoch vo vodomerných staniach boli primárne k dispozícii v hodinovom časovom kroku za obdobie od 2000 do 2016. Keďže zložitá štruktúra a vysoké priestorové a časové rozlíšenie navrhovaného hydrologického modelu spôsobujú, že model je výpočtovo veľmi náročný, časť kalibrácie sa uskutočnila na denných údajoch o prietokoch. Tie sa získali buď od zodpovedných organizácií, alebo agregáciou hodinového súboru údajov.

Distribúované hydrologické modelovanie sa tiež opiera o množstvo geopriestorových súborov vektorových alebo rastrových údajov. Tieto súbory údajov sa väčšinou používajú v procese budovania štruktúry modelu alebo pri odhade parametrov modelu. Pri hydrologickom modelovaní, boli použité, digitálny model terénu (DEM) zo súboru údajov EU-DEM Európskej Environmentálnej Agentúry (EEA) a programu COPERNICUS vo verzii 1.1, pôdny kry CORINE, GLIMS – súbor údajov o ľadovcoch.

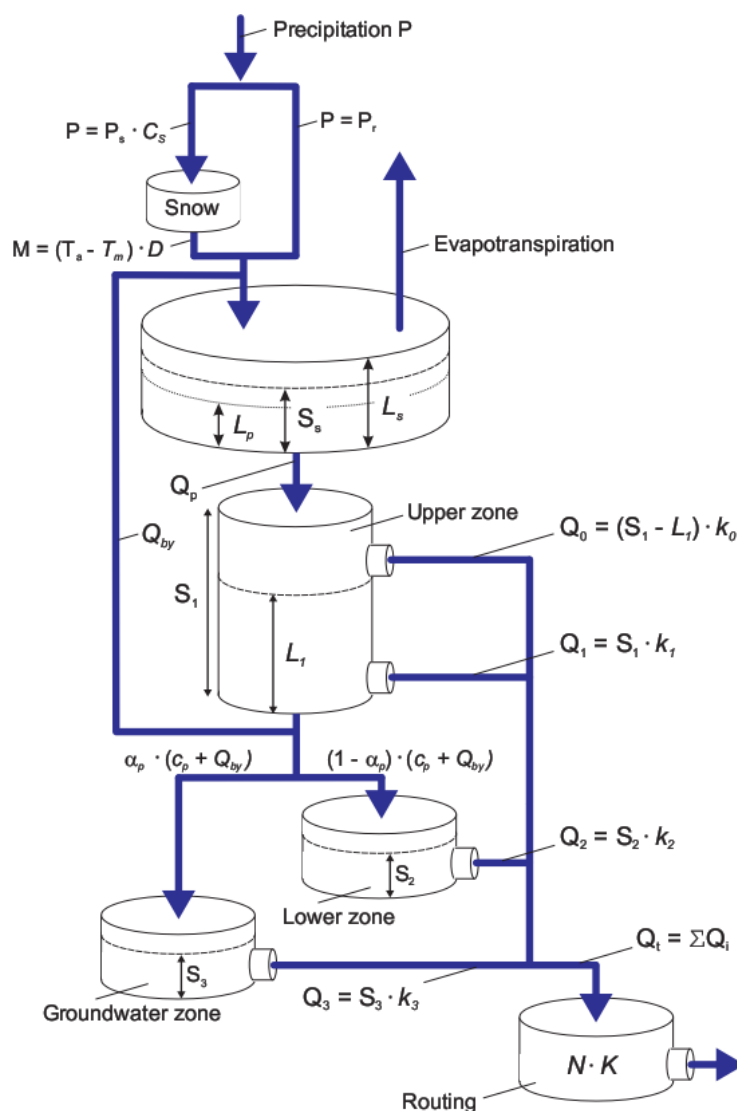
3.3 Popis modelu

Hydrologický model použitý na simulácie v rámci práce je distribuovaný koncepčný model vodnej bilancie. Je založený na zrážkovo-odtokovom modeli HBV, ktorý bol vyvinutý začiatkom 70. rokov vo Švédskom hydrometeorologickom inštitúte (SMHI - Swedish Meteorological and Hydrological Institute) pod vedením Bergströma (1995). Model obsahuje postupy na simuláciu akumulácie a topenia snehu, bilancie pôdnej vlhkosti a smerovania odtoku na svahoch a vo vodných tokoch. Model má modulárnu štruktúru a dá sa pomerne ľahko prispôbiť.

Základnú vodnú bilanciu možno opísať rovnicou 3.1.

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}[SP + SM + UZ + LZ + lakes] \quad (3.1)$$

so zrážkami P , evapotranspiráciou E , odtokom Q , snehovou pokrývkou SP , pôdnou vlhkosťou SM , vodou v hornej pôdnej zóne UZ , vodou v dolnej pôdnej zóne LZ a objemom vody zachytenej v jazerách (lakes).



Obr. 3 Schéma hydrologického modelu použitého na simulácie odtoku (Nester et al., 2011)

4 Výsledky

Prietoky boli simulované vo viacerých riečnych profiloch prítokov Dunaja a Drávy, riečne profily boli vybrané s ohľadom na rovnomerné priestorové pokrytie celej riečnej siete. Na zreteľ boli brané špecifické body záujmu ako napríklad sútoky, nádrže, prevody vody a pod. V práci bol použitý zrážkovo-odtokový model typu HBV, s priestorovo distribuovanou (gridovou) štruktúrou. Hydrologický model bol špecificky upravený pre prevládajúce hydrologické procesy pozorované najmä v oblastiach Rakúska a Bavorska. Simulácie boli realizované v gride 2x2 km v hodinovom časovom kroku. Z hydrologického hľadiska bolo hlavným účelom pri kalibrácii modelu dosiahnuť čo najpresnejšie simulácie extrémnych povodňových prietokov. Kalibrácia modelu bola preto zameraná primárne na správnu simuláciu kulminačných prietokov, ale na zreteľ sa brali aj výsledky simulácii stredných a nízkych prietokov. Výsledky sú demonštrované na vybraných vzorových povodiach vnorených do povodí riek Dunaj a Dráva, pre ktoré bol model vytvorený. Model bol kalibrovaný a validovaný v období 2007–2016. Aj napriek tomu, že prvé kalibrácie vykazovali pomerne dobrú štatistickú zhodu najmä v ukazovateli NSE, bolo odpozorované, že model mierne podhodnocuje simuláciu extrémnych maximálnych prietokov. Hlavným cieľom bolo model kalibrovať tak, aby čo najlepšie zachytával simulácie najväčších povodní, preto bola vykonaná korekcia odchýlky modelu. V tejto metóde známej ako korekcia BIAS (z angl. BIAS correction), sú všetky prietoky s dobou opakovania alebo prekročenia väčšou ako 1 rok navýšené o hodnotu ΔQ , ktorá bola stanovená ako rozdiel medzi pozorovaným a simulovaným prietokom. Táto korekcia je implementovaná priamo v štruktúre modelu.

Kalibrácia a simulácie boli pre účely dizertačnej práce realizované pre šesť vybraných povodí s rôznymi geografickými a klimatickými charakteristikami. Cieľom bolo vyhodnotiť spoľahlivosť HBV modelu v rôznych podmienkach. Diskusia sa zameriava na porovnanie výkonnosti modelu, bilancie zložiek hydrologického cyklu, sezónnej dynamiky prietokov a rozdelenia extrémov.

4.1 Vyhodnotenie kalibrácie modelu

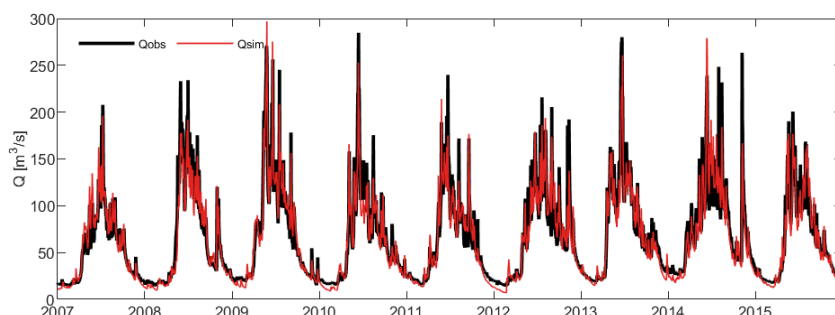
Presnosť simulácií modelu TUW bola vyhodnotená pomocou troch bežne používaných štatistických ukazovateľov: Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), volumetric efficiency (VE) a Kling–Gupta efficiency (KGE). Tieto ukazovatele poskytujú komplexný pohľad na výkonnosť modelu z hľadiska zhody priebehu simulovaných a pozorovaných prietokov, objemovej bilancie a reprodukcie variabilit. Kalibrácia a validácia modelu bola vyhodnotená v období rokov 2007-2016.

Tab. č. 1 Vyhodnotenie štatistických ukazovateľov

Stanica	Rieka - charakter	IDX	NSE	VE	KGE
Oberdrauburg (DFÜ)	Dráva - Horské povodie	1083	0,86	0,78	0,88
Jägerberg	Enns - Horské povodie	1251	0,9	0,84	0,94
Innsbruck (oberh. Sill)	Inn - Horské povodie	1269	0,87	0,83	0,87
Heitzenhofen	Naab - Nížinné povodie	1261	0,93	0,87	0,95
Trausnitz u. d. Mühle	Pfreimd - Nížinné povodie	710	0,86	0,89	0,92
Ampermoching	Amper - Nížinné povodie	1104	0,88	0,83	0,93

Model sa ukázal ako dobre prispôsobiteľný pre rôzne typy povodí – od menších a citlivých (ako Pfreimd) až po rozsiahle alpské toky (ako Dráva či Enns). Zistené rozdiely v hodnotách štatistických ukazovateľov budú ďalej rozobraté v súvislosti s bilanciou zrážok, sezónnosťou a reprodukciou extrémov. Štatistické ukazovatele nepreukázali významné rozdiely, mierne lepšiu zhodu medzi simulovanými a pozorovanými

prietokmi však vykázali nížinné povodia. Na nasledujúcom obrázku č. 4 je vzorovo znázornené porovnanie pozorovaných a simulovaných prietokov v kalibračnom období 2007-2016, pre vybrané povodie.



Obr. 4 Porovnanie prietokov pre obdobie rokov 2007-2016, povodie IDX 1083 Oberdrauburg (Dráva), čiernou pozorované a červenou simulované prietoky

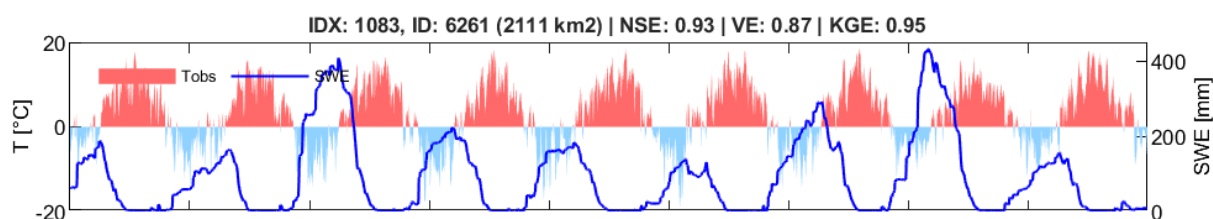
V nížinných oblastiach, ktoré majú viac poľnohospodárskej plochy, poprípade sú lesnatejšie a menej bohaté na snehové zrážky, bolo vidieť miernejšiu sezónnosť. V tomto type povodí významnejšie vplýva na odtok evapotranspirácia a maximálne prietoky sú spôsobené skôr búrkami a zrážkami s vysokou intenzitou (lejaky). Toto porovnanie poskytuje relatívne detailný pohľad na sezónnu dynamiku, na kulminácie maximálnych prietokov, ale zachytáva aj suché obdobia ktoré sú opačným extrémom. Vo väčšine prípadov sú simulácie dobre zladené s pozorovanými údajmi. Pre detailnejšie zobrazenie vidíme v nasledujúcej tabuľke č. 2 porovnanie hodnoty ΔQ ktorá predstavuje rozdiel medzi ročným priemerom simulovaných a pozorovaných prietokov v jednom roku.

Tab č. 2 Rozdiel medzi ročným priemerom pozorovaných a simulovaných prietokov (ΔQ) na analyzovaných povodiach

Stanica	Rieka - charakter	IDX	ΔQ
Oberdrauburg (DFÜ)	Dráva - Horské povodie	1083	-2,6%
Jägerberg	Enns - Horské povodie	1251	-1,1%
Innsbruck (oberh. Sill)	Inn - Horské povodie	1269	-4,2%
Heitzenhofen	Naab - Nížinné povodie	1261	+3,6%
Trausnitz u. d. Mühle	Pfreimd - Nížinné povodie	710	+10%
Ampermoching	Amper - Nížinné povodie	1104	+2,3%

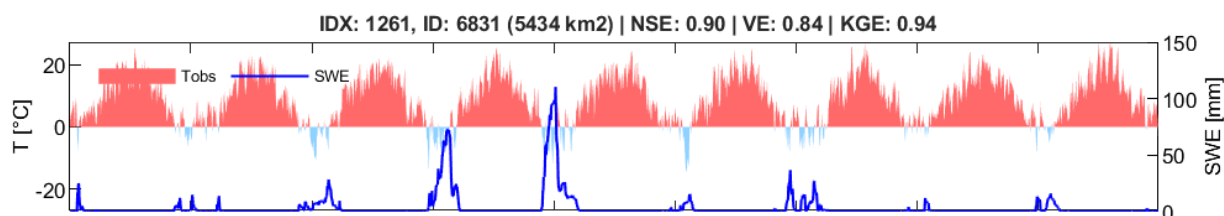
Objemová odchýlka medzi simulovanými a pozorovanými prietokmi ΔQ predstavuje dôležitý ukazovateľ dlhodobej presnosti modelu. V tabuľke č. 2 je jasne vidieť, že v horských povodiach model mierne podhodnocuje simulované prietoky. To môže súvisieť s náročnejšou reprezentáciou topenia a akumulácie snehových zrážok, alebo vplyv topenia ľadovcov na celkový odtok. Naopak je vidieť, že v nížinných povodiach je to opačne a model mierne nadhodnocuje objemy simulovaných prietokov. Je možné, že je to spôsobené slabším zachytením evapotranspirácie na rozsiahlych rovinách a poliach, alebo aj slabým odhadom retenčnej kapacity povodí. Tieto odchýlky sú však relatívne nízke. Vyššiu neistotu vykázalo povodie Trausnitz u. d. Mühle na rieke Pfreimd, čo môže byť spôsobené aj tým, že toto povodie má rádovo menšiu plochu (545 km²) ako ostatné povodia.

Správne simulovanie akumulácie vody v snehovom submodeli je kľúčové pre spoľahlivé hydrologické modelovanie, najmä ak ide o povodia s výraznou sezónnosťou, ako sú horské oblasti. Vodná hodnota snehu je dôležitým prvkom bilancie vody na povodí, medzi zrážkami, evapotranspiráciou a odtokom. V obdobiach s výdatnými snehovými zrážkami sa zvyšuje celkové množstvo vstupujúcej vody do povodia, v čase topenia snehu. Tieto procesy musí model správne zachytiť. Na obrázku č. 5 a 6, môžeme vidieť vplyv teploty vzduchu na simulácie vodnej hodnoty snehu na dvoch vybraných povodiach.



Obr. 5 Závislosť medzi teplotou a simulovanou vodnou hodnotou snehu v kalibračnom období na vybranom horskom povodí Oberdauburg (rieka Dráva). Červenou a modrou farbou je znázornená priemerná denná teplota vzduchu a tmavo modrou čiarou vodná hodnota snehu (SWE)

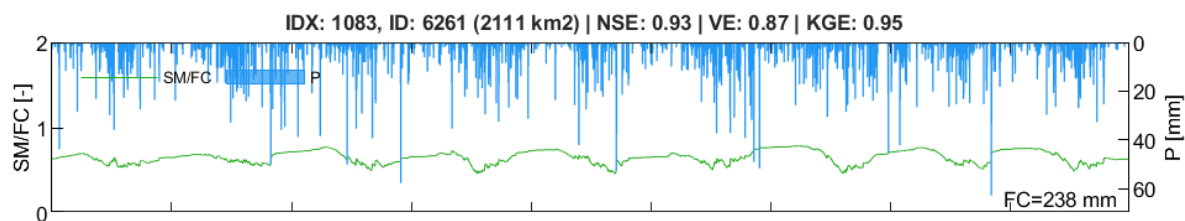
Simulácia v snehovom submodeli prebiehala pomocou metódy prahových teplôt (angl. degree day factor), kde model rozlišuje skupenstvo zrážok na základe prahových teplôt. Na obrázku č. 5 Obr. môžeme vidieť, že model zachytáva sezónny trend akumulácie snehu vo vybranom horskom povodí. Toto je dôležitým kontrolným prvkom správnosti kalibrácie modelu. Pomocou simulácii vodnej hodnoty snehu sa overovala realistikosť sezónneho cyklu a nábeh jarných prietokov, ktorý je pri horských povodiach zrejмый.



Obr. 6 Závislosť medzi teplotou a simulovanou vodnou hodnotou snehu v kalibračnom období na vybranom nížinnom povodí Heitzenhoven (rieka Naab). Červenou a modrou farbou je znázornená priemerná denná teplota vzduchu a tmavo modrou čiarou vodná hodnota snehu (SWE)

Z obrázkov 5 a 6 je zrejmé, že akumulácia snehu predstavuje menšie percento podielu na odtoku v nížinných povodiach. Ale aj napriek tomu je vidieť, že model mierne zachytáva sezónnosť zimných období, aj keď z dôvodu vyšších teplôt a nižších úhrnov snehových zrážok sú jarné obdobia topenia snehu výrazne kratšie ako na horských povodiach.

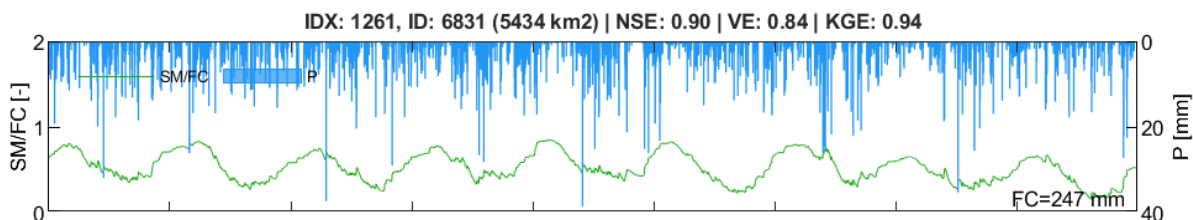
Obrázky č. 7 a 8 znázorňujú dynamiku pôdnej vlhkosti vyjadrenej ako pomer medzi aktuálnou pôdnou vlhkosťou (SM) a poľnou kapacitou (FC) v dennom časovom kroku, spolu s úhrnmi zrážok (P) pre vybrané horské a nížinné povodia. Tento pomer predstavuje mieru nasýtenosti pôdy a priamo ovplyvňuje, či zrážky budú transformované na odtok, alebo budú absorbované pôdou.



Obr. 7 Reakcia nasýtenia pôdy vyjadrená ukazovateľom nasýtenosti pôdy a úhrnom zrážok pre vybrané horské povodie. Modrou sú znázornené úhrny zrážok a zelenou čiarou ukazovateľ nasýtenosti pôdy ktorý je vyjadrením podielu medzi pôdnou vlhkosťou SM a poľnou kapacitou FC (hodnoty 0-1)

V horských povodiach bol pomer SM/FC po väčšinu roka blízky hodnote 1, čo svedčí o vysokom nasýtení pôdneho profilu. To znamená, že pôda bola častokrát blízko plnej kapacity, a preto aj menšie zrážkové epizódy mohli generovať významný odtok. Tieto povodia vykazovali rýchlu odozvu na zrážky, čo je typické pre oblasti s menšou retenčnou kapacitou a strmším reliéfom. Zreteľné sú sezónne výkyvy, najmä počas jarného topenia snehu, kedy sa SM/FC náhle zvyšuje.

Naopak, nížinné povodia vykazovali výrazne variabilnejší pomer SM/FC. V priebehu roka sa hodnota častejšie pohybovala pod hranicou 0,5, čo signalizuje nedostatočne nasýtenú pôdu a väčší podiel infiltrácie počas zrážkových udalostí. V týchto oblastiach sa väčšina zrážok využila na dopĺňanie pôdnej vlhkosti a evapotranspirácie, a len počas extrémnejších udalostí alebo po dlhších dažďových obdobiach došlo k prekročeniu FC a následnému vzniku odtoku.



Obr. 8 Reakcia nasýtenia pôdy vyjadrená ukazovateľom nasýtenosti pôdy a úhrnom zrážok pre vybrané nížinné povodie. Modrou sú znázornené úhrny zrážok a zelenou čiarou ukazovateľ nasýtenosti pôdy ktorý je vyjadrením podielu medzi pôdnou vlhkosťou SM a poľnou kapacitou FC (hodnoty 0-1)

Tieto výsledky poukazujú na rozdielny režim reakcie pôdy v oboch typoch povodií. Kým v horských oblastiach je pôda často nasýtená a má nízku retenčnú kapacitu, čo podporuje rýchlu tvorbu odtoku, nížinné oblasti fungujú ako zadržiavací systém, kde pôda dokáže absorbovať značnú časť zrážok. Toto môže byť následok nie len rozdielnej členitosti reliéfu, ale aj vplyvu využívania pôdy. Tento rozdiel má zásadný význam pri simulácii kulminácií, doby odozvy a pri frekvenčnej analýze prietokov.

4.2 Hydrologická bilancia vody v povodiach

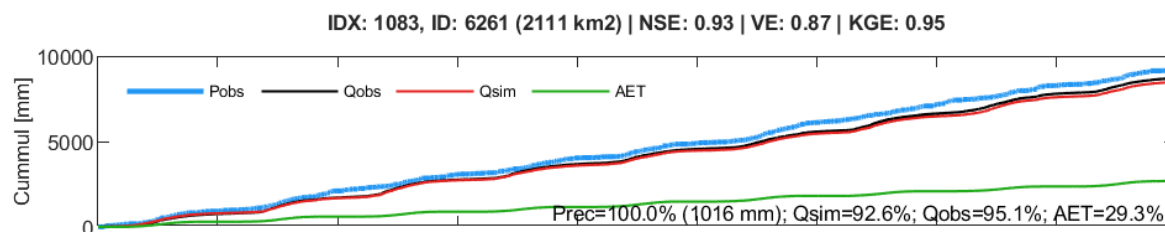
Hydrologická bilancia predstavuje základný nástroj na určenie množstva vody, ktorá prechádza krajinou. Vyjadruje vzťah medzi vodou ktorá vstúpi do povodia v podobe zrážok a výstupmi a zmenami zásob vody v danom území počas definovaného časového obdobia. Najčastejšie sa bilancia zostavuje pre povodie ako hydrologickú jednotku, pričom zohľadňuje hlavné komponenty kolobehu vody: atmosférické zrážky ako vstup, a výstupy vo forme odtoku, evapotranspirácie a prípadných zmien zásob vody.

V dlhodobom meradle sa často predpokladá, že zmena zásob vody je zanedbateľná, bilancia tak môže byť zjednodušená na pomer medzi zrážkami, odtokom a evapotranspiráciou. Evapotranspirácia je dôležitou zložkou hydrologickej bilancie a v oblastiach s hustou vegetáciou, poľnohospodárskym využitím alebo suchším podnebím môže predstavovať dominantnú zložku bilancie. Naopak, v horských oblastiach so strmým reliéfom a nižšími teplotami je podiel evapotranspirácie spravidla nižší a väčšina zrážok odteká. Odtok je výsledkom prebytočných zrážok, ktoré nie sú zadržané vegetáciou, pôdou alebo sa nevyparia. Môže mať formu povrchového odtoku, podpovrchového odtoku alebo odtoku z podzemných vôd. Veľkosť odtoku závisí od mnohých faktorov, ako sú sklon terénu, typ pôdy, nasýtenie pôdneho profilu, vegetačný pokryv a intenzita zrážok. V horských oblastiach je rýchly povrchový odtok častejší, zatiaľ čo v nížinách môže prevažovať pomalší podpovrchový odtok a infiltračné straty. To potvrdzujú aj výsledky zobrazené v tabuľke č. 3 kde môžeme vidieť že horské povodia majú vyšší podiel simulovaného a pozorovaného odtoku v porovnaní s evapotranspiráciou. To zodpovedá očakávaniam, keďže pri vyššom priemernom sklone na povodí väčšia časť zrážok odtečie v podobe priameho odtoku. Nížinné povodia majú nižší odtok okolo 36-39% v prípade simulovaných aj pozorovaných prietokov a vyššiu evapotranspiráciu od 56% do 61% čo je hydrologicky očakávané pre nižšie nadmorské výšky, nižšie priemerné sklony na povodí, pomalší odtok a väčší podiel vegetácie.

Tab. 3 Vodná bilancia jednotlivých povodí

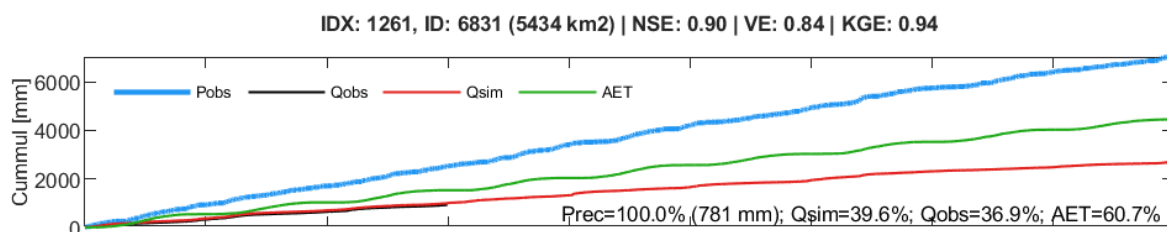
Stanica	Charakter	IDX	P [mm]	Qobs (%)	Qsim (%)	ETsim (%)
Oberdrauburg (DFÜ)	Horské	1083	1016	95,10	92,60	29,30
Jägerberg		1251	1304	80,90	80,00	28,30
Innsbruck (oberh. Sill)		1269	903	102,00	97,70	35,10
Heitzenhofen	Nížinné	1261	781	36,90	39,60	60,70
Trausnitz u. d. Mühle		710	844	36,10	39,30	61,20
Ampermoching		1104	1131	36,60	39,90	56,70

Súčasne si však môžeme všimnúť, že horské povodia vykazujú záporný zostatok bilancie čo znamená, že vzniká väčší odtok než predstavuje prítok zrážok. Môže ísť o menšie chyby vzniknuté pri interpolácii zrážok z najbližších zrážkomerných staníc, alebo model nadhodnocuje evapotranspiráciu. Za zmienku stojí určitý nesúlad na povodí rieky Inn. Je možné, že aj napriek zohľadneniu ľadovcov a snehového režimu nedokážeme úplne presne zachytiť režim topenia snehu a hlavne topenia ľadovcov. Pri nížinných povodiach je zostatok bilancie minimálny a vždy pozitívny, čo indikuje vyvážený výpočet modelu. Mierne pozitívny výsledok môže spôsobiť napríklad infiltrácia do podlažia ktorú model nezachytil. Na obrázkoch č. 9 a 10 môžeme vidieť kumulované hodnoty zrážok, pozorovaných prietokov, simulovaných prietokov a evapotranspirácie v kalibračnom období rokov 2007-2016 pre dve vybrané povodia Oberdrauburg a Heitzenhofen.



Obr. 9 Kumulované hodnoty zrážok (modrou), pozorovaných prietokov (čiernou), simulovaných prietokov (červenou) a evapotranspirácie (zelenou) na horskom povodí Oberdauburg

Tento graf umožňuje vizuálne porovnať, ako hydrologický model zachytáva vodnú bilanciú v horských oblastiach. Kumulované hodnoty umožňujú sledovať dlhodobé odchýlky, nie len okamžité chyby. Aj malá systematická chyba v simulácii sa pri kumulovaných hodnotách prejaví ako postupne rastúci rozdiel medzi krivkami.

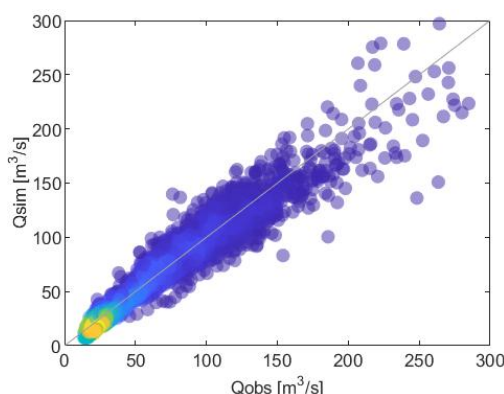


Obr. 10 Kumulované hodnoty zrážok (modrou), pozorovaných prietokov (čiernou), simulovaných prietokov (červenou) a evapotranspirácie (zelenou) na nížinnom povodí Heitzenhofen

Hydrologická bilancia poskytuje užitočný rámec pre hodnotenie dostupnosti vodných zdrojov, analýzu zmien v krajinnom odtoku a dopadov klimatických zmien. Umožňuje identifikovať oblasti s vysokými stratami vody, slabou infiltráciou alebo potenciálom pre akumuláciu vody. V modelových aplikáciách slúži hydrologická bilancia na overenie, či výstupy modelu rešpektujú fyzikálne zákonitosti a zachovávajú konzistenciu medzi vstupmi a výstupmi.

4.3 Vyhodnotenie frekvenčnej analýzy prietokov

Dôležitým predpokladom pre relevantnú aplikáciu frekvenčnej analýzy na synteticky generované alebo modelovo simulované prietoky je overenie ich kvality voči pozorovaným údajom. Okrem základného porovnania časových radov a hodnotenia štatistických ukazovateľov, bola na podporu vizuálnej interpretácie presnosti modelu použitá aj metóda bodových grafov (scatter plot). Grafy znázorňujú závislosť medzi pozorovanými (os x) a simulovanými (os y) prietokmi na vybraných povodiach za kalibračné obdobie. Pre každú dvojicu údajov (denný priemerný prietok) bol v grafe zobrazený príslušný bod, pričom ideálny stav by zodpovedal rozmiestneniu bodov po uhlopriečke $y = x$, ktorá reprezentuje dokonalú zhodu. Na nasledujúcom obrázku č. 11 vidíme závislosť medzi pozorovanými a simulovanými prietokmi na povodí Oberdauburg (rieka Dráva).



Obr. 11 Závislosť medzi pozorovanými (os x) a simulovanými (os y) prietokmi na povodí: IDX 1083, Oberdauburg (rieka Dráva)

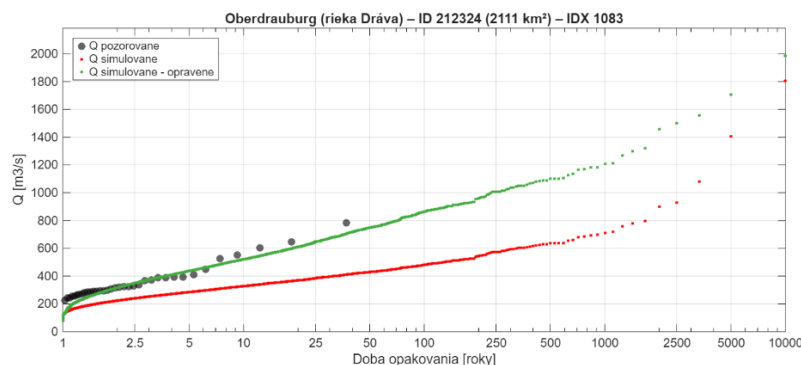
Frekvenčná analýza je citlivá na extrémny a je dôležité aby boli dobre zachytené modelom. Môžeme konštatovať že model vykazuje uspokojivé výsledky. V tejto časti práce bola ďalej spracovaná frekvenčná analýza prietokov, ktorá je dôležitým nástrojom pri určovaní pravdepodobnosti výskytu hydrologických extrémov. Frekvenčná analýza bola realizovaná porovnaním troch typov údajov: pozorovaných maximálnych denných prietokov, simulovaných syntetických radov bez korekcie a simulovaných údajov po aplikácii korekcie na zníženie odchýlok (BIAS korekcie). Na odhady doby opakovania bolo použité Weibullovo empirické rozdelenie pravdepodobnosti. Porovnávané boli hodnoty pre doby opakovania v rozsahu 1 až 10 000 rokov, s dôrazom na návrhové hodnoty s vyššou dobou opakovania.

Na porovnaní tvaru empirických čiar prekročenia pri kalibrácii sa ukázalo že model podhodnocuje maximálne prietoky. Táto systematická chyba môže mať viacero príčin. V zrážkovo odtokovom modeli sa údaje o zrážkach transformujú zo staníc na gridovú mriežku s rozmermi 2x2 km, preto nie je možné na sto percent zachytiť priestorovú variabilitu zrážok. V horských povodiach navyše často absentujú zrážkomerné stanice a to najmä v najvyšších častiach povodí. Navyše použitá metóda interpolácie nezohľadňuje vplyv nadmorskej výšky a orografie na úhrny zrážok. Model čiastočne kompenzuje nižšie zrážkové úhrny znížením miery evapotranspirácie, to však neplatí v prípade väčších úhrnov zrážok ktoré spôsobujú povodne. Samotný fakt že model pracuje v relatívne veľkom rozlíšení, nám napovedá že vstupy aj výstupy z jednej gridovej bunky nebudú vždy presne reprezentovať danú časť povodia. Toto sa môže diať najmä na povodiach s rôznou morfológiou, kde je použitá jednotná štruktúra modelu, ale vieme že napríklad v horskej časti povodia sú spúšťače povodní rozdielne od nížinnej časti toho istého povodia. Kalibrácia síce bola zameraná na správne modelovanie extrémnych povodňových prietokov, ale do optimalizačnej funkcie boli zahrnuté všetky prietoky, aby model mohol správne fungovať vo všetkých podmienkach. Hlavným dôvodom je nedostatok veľkých povodní v historických záznamoch pozorovaných prietokov.

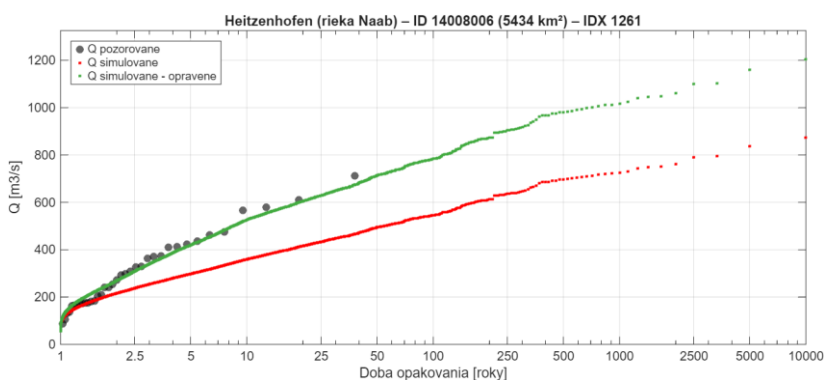
Nakoľko v dizertačnej práci sme sa zamerali na správnu simuláciu maximálnych extrémov a je zrejmé že model podhodnocuje maximálne prietoky systematicky, je potrebné odchýlku odstrániť s cieľom minimalizovať vplyv podhodnotenia maximálnych prietokov. Na odstránenie tejto chyby bola použitá metóda „BIAS correction“, kde všetky prietoky s dobou opakovania > 1rok sa zvýšia o hodnotu ΔQ ktorá sa odhaduje ako rozdiel medzi pozorovanými a simulovanými prietokmi, ktoré sa odčítajú z empirických čiar prekročenia.

Na nasledujúcich grafoch je vidíme empirické čiary prekročenia pozorovaných prietokov, ktoré sú znázornené ako čierne bodky. Ako pozorované prietoky boli použité celé dostupné časové rady prietokov, nie len prietoky z kalibračného obdobia. Červenou farbou je znázornená empirická čiara prekročenia simulovaných prietokov pre 10 000 rokov. Zelenou farbou je vykreslená empirická čiara simulovaných

prietokov pre 10 000 rokov po korekcii BIAS. Na obrázkoch č. 12 - 13, môžeme vidieť porovnanie empirických čiar prekročenia pre vybrané povodia.



Obr. 12 Výsledky frekvenčnej analýzy prietokov na vodomernej stanici Oberdrauburg (rieka Dráva) IDX 1083



Obr. 13 Výsledky frekvenčnej analýzy prietokov na vodomernej stanici Heitzenhofen (rieka Naab) IDX 1261

Na obrázku č. 12 je výsledok frekvenčnej analýzy pre horské povodie Oberdrauburg (rieka Dráva) a na obrázku č. 13 Heitzenhofen (rieka Naab). Výsledky jasne ukazujú, že simulované dáta systematicky podhodnocovali extrémne prietoky, čo sa úspešne korigovalo pomocou korekcie BIAS. V oboch prípadoch sa po korekcii prejavila dobrá zhoda medzi tvarom čiar prekročenia zo simulovaných a pozorovaných údajov, a to najmä v oblasti návrhových prietokov s dobou opakovania do 50 rokov. V prípade prietokov s dlhšou dobou opakovania sa u všetkých povodí zachovala stúpajúca tendencia krivky so simulovanými prietokmi.

5 Závery pre vedu a prax

Práca reaguje na potrebu presného a spoľahlivého odhadu návrhových hydrologických veličín (napr. 100-ročných a vyšších návrhových prietokov) v kontexte zmeny klímy, premenlivosti povodňových režimov a nedostupnosti dlhých radov pozorovaných údajov. Cieľom práce bolo navrhnúť metodický rámec, ktorý kombinuje stochastické generovanie meteorologických údajov, zrážkovo-odtokové modelovanie a frekvenčnú analýzu prietokov tak, aby bol aplikovateľný na rôzne typy povodí. Kľúčovým aspektom je využitie syntetických klimatických údajov na vytvorenie dlhých časových radov simulovaných prietokov, ktoré následne umožňujú spoľahlivejšiu štatistickú analýzu, ako by to bolo možné pri použití historických pozorovaní

Existuje množstvo druhov a prístupov pre zrážkovo-odtokové modelovanie. Preto je výber vhodného typu modelu kľúčovým aspektom ku dosiahnutiu dobrých výsledkov so zreteľom na výpočtovú a časovú náročnosť modelu. Analyzovaná oblasť pokrývala pomerne veľké územie s rozlohou 330 000 km², kde bolo treba brať do úvahy priestorovú a morfológickú variabilitu povodí. Po zohľadnení všetkých aspektov bol na štúdiu vybraný zrážkovo-odtokový model typu HBV, ktorý bol modifikovaný na distribuovanú verziu. Takýto model umožňuje flexibilnú prácu so vstupnými údajmi aj s parametrami modelu. Oblasť obsahovala viacero klimatických pásiem a oblasti s rôznym hydrologickým režimom, od alpských ľadovcov až po urbanizované územia. Preto bolo pre prezentovanie výsledkov práce vybraných 6 povodí, ktoré boli vybrané s ohľadom na to aby reprezentovali rôznorodosť danej oblasti. Boli vybrané 3 horské a 3 nížinné povodia s rôznymi sezónnymi režimami, orografiou, využitím územia atď. Vybrané povodia sa nachádzali na území Rakúska, Nemecka a čiastočne vo Švajčiarsku. Povodia sú vnorené do väčších povodí rieky Dráva a Dunaj.

Kalibrácia a validácia modelu prebiehala v hodinovom časovom kroku. Preto bola potrebná sieť zrážkomerných staníc s údajmi dostupnými v hodinovom kroku. Tie boli doplnené stanicami s dennými pozorovaniami, ktorých údaje sa disagregovali na hodinový časový krok. Rovnaký postup bol zvolený aj pre výber meteorologických staníc s pozorovaniami o teplotách vzduchu. Dáta potom boli metódou vážených priemerov prerozdelené do gridovej mriežky. Na kalibráciu a validáciu modelu boli potrebné tiež dostatočne dlhé rady pozorovaných prietokov. Väčšina povodí sa nachádzala v Rakúsku a v Nemecku, menšia časť vo Švajčiarsku. Údaje o prietokoch boli získané od štátnych inštitúcií ktoré spravujú vodomerné stanice v príslušných regiónoch. Model bol doplnený o geopriestorové údaje, ktoré sa využívali v procese budovania štruktúry modelu, poprípade pri odhade parametrov modelu. Jednalo sa najmä o informácie o riečnej sieti, ľadovcoch, morfológii terénu, využitia územia. Tieto geopriestorové údaje sú zvyčajne dostupné z databáz ako napríklad Európska environmentálna agentúra (EEA), COPENICUS.

Na Technickej univerzite vo Viedni bol vyvinutý stochastický generátor počasia (SWG z angl. Stochastic Weather Generator), ktorý bol využitý na generovanie syntetických časových radov vstupných údajov, ktoré boli využité na simulovanie 10 000 rokov prietokov pre frekvenčnú analýzu prietokov SWG bol založený na pozorovaných údajoch o zrážkach a teplotách a zohľadňoval viacero typov atmosférickej cirkulácie. Ako bolo spomenuté vyššie, dostupné rady údajov boli najmä v dennom časovom kroku, ktoré boli následne disagregované na hodinové. Kalibrácia a validácia modelu bola zameraná na to aby boli dosiahnuté čo najpresnejšie simulácie povodňových extrémov. Model pracuje v gridovej štruktúre s rozmerom bunky rastra 2x2 km. Model bol kalibrovaný v období 2007 – 2016, bolo to obdobie v ktorom boli dostupné dostatočne dlhé časové rady vstupných údajov aj v hodinovom kroku. Model po kalibrácii vykazoval dobrú štatistickú zhodu medzi pozorovanými a simulovanými prietokmi. Vyhodnotené boli rôzne štatistické ukazovatele, objemové odchýlky, bilancia vody vo vybraných povodiach a samostatne boli pozorované reakcie snehového a pôdneho submodelu. Aj keď model vykazoval dobrú zhodu na úrovni NSE 0,86 – 0,93, bolo zistené že model systematicky podhodnocuje maximálne prietoky. Táto odchýlka bola neskôr korigovaná v rámci frekvenčnej analýzy prietokov.

Frekvenčná analýza prietokov bola použitá na určenie významnosti extrémnych prietokov. Celý metodický rámec je prístupom kontinuálnej simulácie prietokov pre využitie vo frekvenčnej analýze prietokov. V práci bola empirická pravdepodobnosť významnosti prietokov vypočítaná podľa Weibullovhovho vzťahu. Boli zostrojené empirické čiary prietokov pre celé rady pozorovaných prietokov a pre 10 000 rokov simulovaných prietokov. Zamerali sme sa na detekciu zmien v meraných a odvodených hydrometeorologických radoch. Bolo zistené že model podhodnocuje extrémne maximá, preto vznikla potreba túto chybu odstrániť, na čo sa využila korekcia odchýlok (BIAS correction). Táto odchýlka sa naplno prejavila po zostrojení empirických čiar prekročenia. Táto korekcia navyšuje simulované prietoky o rozdiel ΔQ ktorý je detekovaný medzi pozorovanými a simulovanými prietokmi. Po korekcii

simulovaných prietokov sa ukázala dobrá zhoda v porovnaní tvarov empirických čiar prekročenia medzi simulovanými a pozorovanými prietokmi. Pre všetky povodia bola zachovaná stúpajúca tendencia krivky so simulovanými prietokmi. Výsledkom frekvenčnej analýzy sú návrhové hodnoty prietokov s rôznou dobou opakovania, ktoré predstavujú výstup metodiky použitej v tejto práci.

Výstupy potvrdzujú, že navrhovaná metodika – založená na stochastickom generovaní vstupov, distribuovanom modelovaní odtoku a empirickej štatistickej analýze – poskytuje spoľahlivý rámec pre určenie návrhových prietokov v podmienkach obmedzenej dĺžky historických pozorovaní. Korekcia odchýlok umožňuje eliminovať podhodnotenie extrémnych udalostí a významne zlepšuje praktickú použiteľnosť výstupov modelu.

Frekvenčná analýza vykonaná na šiestich povodiach rôzneho charakteru ukazuje robustnosť prístupu naprieč topograficky a klimaticky odlišnými regiónmi. Výsledky sú prínosom nielen pre výskum, ale aj pre inžiniersku prax – najmä v oblasti návrhu protipovodňových opatrení a plánovania adaptácií na zmenu klímy. Kapitola tak uzatvára praktickú aplikáciu teoretických modelov a demonštruje ich využiteľnosť pri odhade extrémnych hydrologických javov.

Na základe výsledkov dizertačnej práce možno formulovať niekoľko odporúčaní, ktoré sú relevantné pre vedu a výskum, ale môžu nájsť uplatnenie aj v inžinierskej hydrológii, plánovaní vodohospodárskych opatrení a hodnotení povodňového rizika. Práca prináša komplexný a prenositeľný rámec pre kvantifikáciu extrémnych prietokov. Spája najnovšie poznatky z generovania syntetických časových radov údajov, hydrologického modelovania a štatistickej analýzy. Navrhnutý hybridný prístup je flexibilný a modifikovateľný pre rôzne typy povodí a požiadaviek na výskum. Metodický rámec je po úpravách možné aplikovať na sledovanie zmien v hydrológii povodí, napríklad pri simulovaných zmenách využitia krajiny, aplikácii poznatkov o zmene klímy, simulácie podmienok odtoku pri ústupe ľadovcov alebo aj simulácie sucha. Výsledky dopĺňajú vedeckú diskusiu o spoľahlivosti modelovania extrémnych hydrologických javov vzhľadom na neistotu ktorá vyplýva z nedostatočne dlhých časových radov pozorovaných prietokov. Práca vytvára základ pre ďalší výskum v oblasti využitia zrážkovo-odtokového modelovania, syntetických časových radov meteorologických veličín a určovania prietokov s rôznou významnosťou. Metodika aplikovaná v dizertačnej práci je zároveň použiteľná v rôznych regiónoch kde môžu byť pozorované časové rady vstupných údajov dostupné v kratšom období, poprípade v regiónoch ktoré majú nízke priestorové zastúpenie meraní. Pre návrh vodohospodárskych stavieb je predstavený hybridný prístup vhodnejší ako klasická analýza odhadu návrhových veličín prietokov.

Literatúra

BERGSTROM, S.: The HBV model. Computers models of watershed hydrology, edited by V.P. Sing. Water. Resour. Publ, 1995, pp. 443-476.

BEVEN, K. J.: Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons, 2012, 457 pp.

CHOW, V. T. – MAIDMENT, D. R. – MAYS, L. W.: Applied Hydrology. McGraw-Hill, 1998.

NESTER, T. – KIRNBAUER, R. – GUTKNECHT, D. – BLÖSCHL, G.: Climate and catchment controls on the performance of regional flood simulations, *Journal of Hydrology*, 402(3), 2011 pp. 340–356.

VALENT, P.: Hydrologické simulačné modely pre frekvenčné analýzy. Bratislava: Stavebná fakulta STU, 2012. Diplomová práca.

VALENT, P.: Hydrological modelling report, Final report to Wetrax+ project, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien, 2022.

Zoznam publikačnej činnosti

Autor: Brziak, Adam

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

BRZIAK, Adam. Návrh a validácia člnkového zrážkomera s využitím technológie 3D tlače. In MATOKOVÁ, Katarína. *Zborník súťažných prác mladých odborníkov 2018 [elektronický zdroj]* : Bratislava, 8. november 2018. 1. vyd. Bratislava : Slovenský hydrometeorologický ústav, 2018, CD-ROM, [11] s. ISBN 978-80-88907-98-5. Kategória publikácie do 2021: AFD

BRZIAK, Adam. Analýza výskytu a trvania snehovej pokrývky na vybraných rakúskych povodiach. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj]* : 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 462-466. ISBN 978-80-227-4972-5. Kategória publikácie do 2021: AFD

BRZIAK, Adam - VALENT, Peter - KUBÁŇ, Martin. Low cost precipitation measurement in remote areas. In *Geophysical Research Abstracts. Volume 22/2020 [elektronický zdroj]* : the open-access abstracts of the EGU General Assemblies. Göttingen : Copernicus Publications, 2020, online, [1] s. ISSN 1607-7962. Kategória publikácie do 2021: AFG

BRZIAK, Adam. Tvorba máp parametrov pre distribuovaný zrážkovo odtokový model. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj]* : 30th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 14th 2020, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2020, CD-ROM, s. 555-559. ISBN 978-80-227-5052-3. Kategória publikácie do 2021: AFD

BRZIAK, Adam - KOHNOVÁ, Silvia - KUBÁŇ, Martin. Comparison of measured and simulated snow cover occurrence using two versions of the TUW hydrological model. In *6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium - WMESS 2020 : proceedings. 7-11 September 2020, Prague, Czech Republic*. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2020, online, [7] s., art. no. 012032. ISSN 1755-1307. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85097996286 ; DOI: 10.1088/1755-1315/609/1/012032. Kategória publikácie do 2021: AFC

BRZIAK, Adam. Vplyv využitia územia a morfológie povodí na efektívnosť zrážkovo odtokového modelu. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj]* : 31st Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 13th 2021, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2021, CD-ROM, s. 544-549. ISBN 978-80-227-5150-6. Kategória publikácie do 2021: AFD

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam - PARAJKA, Juraj. Simulating the soil moisture and snow water equivalent with the TUW model simulating. In *HydroCarpath 2019. Catchment Processes in Regional Hydrology: Coupling Field Experiments and Data Assimilation into Process Understanding and Modeling in Carpathian Basins : posters and abstracts of the conference. Vienna/Bratislava/Sopron, 14. 11. 2019*. 1. vyd. Sopron : University of Sopron Press, 2019, S. 30. ISBN 978-963-334-349-4. Kategória publikácie do 2021: AFG

KUBÁŇ, Martin - SLEZIAK, Patrik - BRZIAK, Adam - HLAŤOVÁ, Kamila - SZOLGAY, Ján. Regionalization of the potential to increase rainfall-runoff model performance by multi-objective calibration using MODIS data over Austria. In *Geophysical Research Abstracts. Volume 22/2020 [elektronický zdroj]* : the open-access abstracts of the EGU General Assemblies. Göttingen : Copernicus Publications, 2020, online, [1] s. ISSN 1607-7962.

Kategória publikácie do 2021: AFG

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam. The variances in the parameter and calibration efficiencies of two HBV-type models. In *HydroCarpath 2020. Processes, patterns and regimes in the hydrology of the Carpathians: coupling experiments, remote sensing, citizen science and modelling [elektronický zdroj]* : abstracts of the conference. Vienna/Bratislava/Sopron, 3. 12. 2020. 1. vyd. Sopron : University of Sopron Press, 2020, USB kľúč, s. 16. ISBN 978-963-334-375-3. Kategória publikácie do 2021: AFG

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam - SZOLGAY, Ján - KOHNOVÁ, Silvia. Hydrologic characteristic simulation on the selected Austrian catchments with conceptual HBV type rainfall-runoff model. In *Transport of water, chemicals and energy in the soil-plant-atmosphere system in conditions of the climate variability [elektronický zdroj]* : book of Abstracts and Posters. Via the WEB Portal, November, 11-13 2020. 1. vyd. Bratislava : Institute of Hydrology of the Slovak Academy of Sciences, 2020, CD-ROM, s. 37. ISBN 978-80-89139-48-4. Kategória publikácie do 2021: AFH

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam. Soil moisture simulation in selected Austrian catchments with use of the TUW conceptual semi-distributed rainfall runoff model. In *6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium - WMESS 2020 : proceedings. 7-11 September 2020, Prague, Czech Republic*. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2020, online, [7] s., art. no. 012031. ISSN 1755-1307. V databáze: DOI: 10.1088/1755-1315/609/1/012031 ; SCOPUS: 2-s2.0-85097973226. Kategória publikácie do 2021: AFC

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam - KOHNOVÁ, Silvia. The role of land use and morphology representation in the setup and calibration of the conceptual TUW model. In *7th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium - WMESS 2021 [proceedings. 6th-10th September 2021, Prague, Czech Republic]*. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2021, online, [10] s., art. no. 012050. ISSN 1755-1307. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85121424622 ; DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012050. Kategória publikácie do 2021: AFC

VALENT, Peter - BRZIAK, Adam. 3D printed rain gauge for citizen science. In *HydroCarpath 2018. Catchment Processes in Regional Hydrology: Field Experiments and Modelling in Carpathians Basins : posters and abstracts of the conference. Vienna/Bratislava/Sopron, 12. 11. 2018*. 1. vyd. Sopron : University of Sopron Press, 2018, S. 37. ISBN 978-963-334-199-5. Kategória publikácie do 2021: AFK

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

BRZIAK, Adam - KUBÁŇ, Martin - KOHNOVÁ, Silvia - SZOLGAY, Ján. Comparison of the variances of a lumped and semi-distributed model parameters. In *Acta hydrologica Slovaca [elektronický zdroj]*. Roč. 21, č. 2 (2020), online, s. 172-177. ISSN 2644-4690 (2020). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85108278154 ; DOI: 10.31577/ahs-2020-0021.02.0021. Kategória publikácie do 2021: ADN

BRZIAK, Adam - KUBÁŇ, Martin - KOHNOVÁ, Silvia - SZOLGAY, Ján. Comparison of the variability of snow cover parameters of the HBV model using lumped and distributed precipitation inputs and multi-basin calibration. In *Acta hydrologica Slovaca [elektronický zdroj]*. Roč. 22, č. 1 (2021), online, s. 40-49. ISSN 2644-4690 (2021: 0.188 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85111242317 ; DOI: 10.31577/ahs-2021-0022.01.0005. Kategória publikácie do 2021: ADN

KUBÁŇ, Martin - PARAJKA, Juraj - TONG, Rui - GREIMEISTER-PFEIL, Isabella - VREUGDENHILL, Mariette - SZOLGAY, Ján - KOHNOVÁ, Silvia - HLAVČOVÁ, Kamila - SLEZIAK, Patrik - BRZIAK, Adam. The effects of satellite soil moisture data on the parametrization of topsoil and root zone soil moisture in a conceptual hydrological model. In *Journal of hydrology and hydromechanics = Vodohospodársky časopis*. Vol. 70, no. 3 (2022), s. 295-307. ISSN 0042-790X (2022: 1.9 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.51 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.2478/johh-2022-0021 ; CC: 000844216000004 ; SCOPUS: 2-s2.0-85138772679. Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: ADD

KUBÁŇ, Martin - PARAJKA, Juraj - SZOLGAY, Ján - KOHNOVÁ, Silvia - HLAVČOVÁ, Kamila - SLEZIAK, Patrik - BRZIAK, Adam. Improvement of runoff simulation efficiency using satellite soil moisture data for typical monthly runoff regimes in Austria. In *Acta hydrologica Slovaca*. Roč. 23, č. 2 (2022), online, s. 257-266. ISSN 2644-4690 (2022: 0.159 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.31577/ahs-2022-0023.02.0029 ; SCOPUS: 2-s2.0-85146840768. Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: ADN

NOSKO, Radovan - MALIARIKOVÁ, Marcela - BRZIAK, Adam - KUBÁŇ, Martin. Formation of gully erosion in the Myjava region. In *Slovak Journal of Civil Engineering*. Vol. 27, no. 3 (2019), s. 63-72. ISSN 1210-3896 (2019). V databáze: WOS: 000489334200008 ; DOI: 10.2478/sjce-2019-0023. Kategória publikácie do 2021: ADN

O2 Odborný výstup publikačnej činnosti ako časť knižnej publikácie alebo zborníka

BRZIAK, Adam - KUBÁŇ, Martin. Influence of morphology and land use in multi-basin calibration of conceptual TUW model. In *Book of Abstracts of the Annual Symposium 2021 of the Vienna Doctoral Programme on Water Resource Systems [elektronický zdroj] : Emmersdorf an der Donau, Austria, October 19-20, 2021*. 1. vyd. Vienna : Centre for Water Resource Systems Technical University Vienna, 2021, USB kľúč, s. 18. Typ výstupu: abstrakt z podujatia;

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam - RATTAYOVÁ, Viera. Scatterometer soil moisture data for the conceptual rainfall-runoff model. In *Abstracts and Presentation EGU General Assembly 2022 (EGU22) [elektronický zdroj] : EGU sphere - The EGU interactive community platform*. 1. vyd. Göttingen : Copernicus Publications, 2022, online, [1 s.], art. no. EGU22-2283. Dostupné na internete: <<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-2283.html>>. V databáze: DOI: 10.5194/egusphere-egu22-2283. Typ výstupu: abstrakt z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: GHG

BRZIAK, Adam - KOHNOVÁ, Silvia - KUBÁŇ, Martin - SZOLGAY, Ján. Differences in the parameters and calibration efficiencies of two HBV model types. In *Abstracts and Presentation EGU General Assembly 2021 [elektronický zdroj] : EGU sphere - The EGU interactive community platform*. 1. vyd. Göttingen : Copernicus Publications, 2021, online, [1 s.], art. no. EGU21-5156. Dostupné na internete: <<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-5156.html>>. V databáze: DOI: 10.5194/egusphere-egu21-5156. Kategória publikácie do 2021: GHG

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam - SZOLGAY, Ján. Testing of the conceptual TUW model structure for the Austrian catchments. In *Transport of water, chemicals and energy in the soil-plant-atmosphere system in conditions of the climate variability [elektronický zdroj] : book of Abstracts from the 28th POSTER DAY 2021. Virtuálny priestor, 10 November, 2021*. 1. vyd. Bratislava : Institute of Hydrology of the Slovak Academy of Sciences, 2021, online, s. 44. ISBN 978-80-89139-51-4. Kategória publikácie do 2021: AFH

KUBÁŇ, Martin - BRZIAK, Adam. The value of ASCAT data for the calibration of a conceptual hydrological model. In *HydroCarpath 2021. Catchment and River Processes in Regional Hydrology: Coupling Field Experiments and Data Assimilation into Process Understanding and Modeling in Carpathian Basins [elektronický zdroj] : abstracts and posters of the conference. Vienna/Bratislava/Sopron, 26. 11. 2021*. 1. vyd. Sopron : University of Sopron Press, 2021, USB kľúč, s. 14, article ID : P2. ISBN 978-963-334-414-9. Kategória publikácie do 2021: AFG